



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-91-99>

УДК 615.47

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И БИООБЪЕКТОВ

А. Н. ОСИПОВ¹, Т. МА¹, М. В. ТУМИЛОВИЧ¹, А. В. ПАЦЕЕВ², С. В. ПАЦЕЕВ³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Республиканский центр медицинской реабилитации и бальнеолечения (Минск, Республика Беларусь)

³ООО «Клиника «Мерси» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Применение плазменных технологий в технике, и особенно в здравоохранении, требует решения задач оценки воздействия и взаимодействия плазмы с поверхностью материалов. В статье представлены разработанные методы достоверного контроля состояния плазмы и ее взаимодействия с поверхностью объектов, что обеспечивает воспроизводимость технологических процессов обработки поверхностей материалов и терапевтических процедур, расширенные возможности повышения эффективности применения плазменных технологий в здравоохранении. Проведена оценка воздействия плазмы на поверхность различных органических и неорганических материалов, биологических тканей, а также оценка взаимодействия с ними. Для качественной и количественной оценки предложено использовать вольт-амперные характеристики и мощность, выделяемую в нагрузку «плазма–объект». Установлено, что мощность, выделяемая на нагрузку при взаимодействии с холодной плазмой, зависит от материала, на который воздействует плазма. Этот параметр необходимо контролировать при обработке материалов и биологических тканей. Показано, что имеются различия в значениях активной мощности, выделяемой на электродах разрядной системы, для образцов биологической ткани (подкожно-жировая клетчатка и мышечные ткани). При этом данное различие увеличивается с ростом выходного напряжения.

Ключевые слова: холодная атмосферная плазма, вольт-амперные характеристики, биологические ткани, электрическое напряжение, генератор плазмы, активная мощность, взаимодействие плазмы с поверхностью материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Оценка взаимодействия холодной атмосферной плазмы диэлектрического барьерного разряда с поверхностью различных материалов и биообъектов / А. Н. Осипов [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 91–99. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-91-99>.

EVALUATION OF THE INTERACTION OF COLD ATMOSPHERIC PLASMA OF A DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE WITH THE SURFACE OF VARIOUS MATERIALS AND BIOLOGICAL OBJECTS

ANATOLY OSIPOV¹, TIANBAO MA¹, MIRASLAU TUMILOVICH¹,
ALEXANDR PATSEYEV², SEARHEI PATSEYEU³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Republican Center for Medical Rehabilitation and Balneotherapy (Minsk, Republic of Belarus)

³LLC “Mercy Clinic” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The application of plasma technologies in engineering, and particularly in healthcare, requires assessing the impact and interaction of plasma with material surfaces. This article presents developed methods for reliably monitoring the plasma state and its interaction with the surface of objects, ensuring the reproducibility of techno-

logical processes for surface treatment of materials and therapeutic procedures, as well as expanded opportunities for increasing the efficiency of plasma technologies in healthcare. An assessment of the impact of plasma on the surface of various organic and inorganic materials, biological tissues, and an assessment of the interaction with them was carried out. For a qualitative and quantitative assessment, it is proposed to use the volt-ampere characteristics and the power released in the “plasma-object” load. It has been established that the power released at the load during interaction with cold plasma depends on the material being exposed to the plasma. This parameter must be monitored when processing materials and biological tissues. It is shown that there are differences in the values of active power released at the electrodes of the discharge system for biological tissue samples (subcutaneous fat and muscle tissue). Moreover, this difference increases with increasing output voltage.

Keywords: cold atmospheric plasma, volt-ampere characteristics, biological tissues, electric voltage, plasma generator, active power, interaction of plasma with the surface of the material.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Osipov A., Ma T., Tumilovich M., Patseyev A., Patheyeu S. (2026) Evaluation of the Interaction of Cold Atmospheric Plasma of a Dielectric Barrier Discharge with the Surface of Various Materials and Biological Objects. *Doklady BGUIR*. 24 (1), –. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-XX-XX> (in Russian).

Введение

Разработка новых подходов к методам возбуждения и генерации холодной атмосферной плазмы (ХАП) обусловлена постоянно возрастающими уникальными возможностями ее применения. В настоящее время наблюдается бурный рост внедрения технологии ХАП в самых различных областях реального сектора экономики: микроэлектронике (производство изделий электронной техники), оптике (обработка и нанесение покрытий), химической и фармацевтической промышленности, при получении новых материалов (изменение свойств поверхности различных материалов неразрушающим способом), в охране окружающей среды (технологии очистки воды, воздуха и др.), биологии и т. д. [1]. Следует отметить появление нового направления в здравоохранении – области плазменной медицины, в которой выделяют пять подобластей: плазменная обработка биомедицинских материалов, плазменная дезактивация, плазменная биология, плазменное заживление ран и плазменная онкотерапия [2–4]. При этом характеристики ХАП имеют свои особенности в зависимости от области применения, а диагностика плазмы остается одним из краеугольных камней достижений в области науки ХАП.

Однако сложная природа плазменных устройств и отсутствие соответствующих технических средств не позволяют оценить степень взаимодействия плазмы с поверхностью материалов [5, 6]. В этой связи применение плазменных технологий в технике, и особенно в здравоохранении, требует решения задач оценки воздействия и взаимодействия плазмы с поверхностью материалов. В соответствии с ИЕС 60601-1:2020, гарантия «точности регулирования отдаваемой энергии ПАЦИЕНТУ» является одним из основных требований, обеспечивающих безопасность применения электрических медицинских изделий. Поэтому разработка методов и устройств, позволяющих достоверно контролировать состояние плазмы, ее взаимодействия с поверхностью объектов, воспроизводимость измерений и расширенные возможности верификации, – важная и актуальная задача, решение которой обеспечит повышение эффективности применения плазменных технологий в здравоохранении.

Методика и оборудование для проведения исследований и обработки результатов

В [7] показано, что атмосферная плазма характеризуется нелинейным импедансом. Изменение характера взаимодействия с поверхностью объекта сопровождается изменением нагрузочного импеданса и, соответственно, изменением параметров сигнала (мгновенных значений напряжений и токов), возбуждающих плазму. Для оценки изменения импеданса плазмы в [7, 8] предложены методики анализа ее проходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) и анализа мощности, выделяемой в нагрузку, при изменении различных параметров генератора. Построение проходных ВАХ и расчет мощности, выделяемой в нагрузку, осуществляются на основе регистрации и обработки данных о мгновенных значениях тока и напряжения в выходной цепи.

В процессе экспериментов исследовано воздействие ХАП на материалы, широко применяемые в здравоохранении, такие как медицинская сталь (скальпели, зажимы, стоматологические

инструменты и др.), стекло (лабораторное стекло, посуда и др.), фторопласт (покрытия для эндоскопов и катетеров, искусственных сосудов и клапанов, мембраны в стоматологии для направленной регенерации тканей и др.), латекс и резина (медицинские перчатки и др.). Размеры названных объектов составляли 3×3×1 см. Материалом для исследования биологических тканей служили образцы (размерами 3×3×3 см) из брюшной стенки свиньи (подкожно-жировая клетчатка и мышечные ткани).

При проведении исследований использовали экспериментальный стенд (рис. 1), включающий генератор ХАП с разрядной системой коаксиального типа и электродами, баллон с инертным газом аргоном, датчики тока и напряжения для регистрации значений тока и напряжения, протекающих/подаваемых на электроды, осциллограф и персональный компьютер (ПК) для регистрации тока и напряжения и расчета на их основе параметров оценки взаимодействия плазмы с поверхностью объектов. Размеры плазменного факела: длина – до 3 см, диаметр – около 1 см. Напряжение сигнала, возбуждающего плазму, изменялось в пределах 4–8 кВ, резонансная частота составляла 50 кГц. Для всех проводимых экспериментов выполнялось условие постоянства объема расхода инертного газа – 25–26 л/ч.

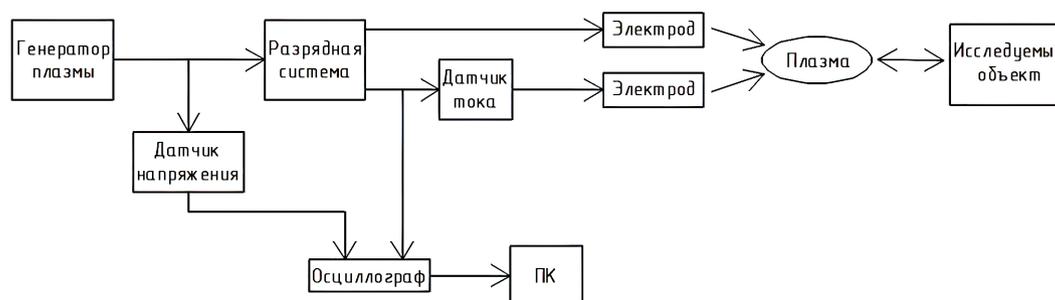


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда
Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup

Для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью объектов использовалась оригинальная методика, основанная на измерении параметров сигналов, возбуждающих плазму (мгновенных значений напряжения и токов), вычислении и анализе изменений форм проходных ВАХ, расчете активной мощности, выделяемой на нагрузке «плазма–объект» [7, 8]. На первом этапе изучалось изменение формы ВАХ при изменении частоты возбуждающего сигнала без взаимодействия с объектом для различных напряжений на электродах разрядной системы. Для оценки этих изменений рассчитывались площадь $S_{ВАХ}$, периметр кривых $L_{ВАХ}$ и отношение $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$. На втором этапе исследовалось взаимодействие плазмы с поверхностью объектов, изготовленных из металлов, неорганических и органических материалов, а также с образцами, полученными из тканей биоматериалов. Оценка взаимодействия выполнялась на основе анализа изменения активной мощности, выделяемой в нагрузку, и изменения формы ВАХ. Активную мощность рассчитывали с учетом измеренных мгновенных значений напряжений и токов [9].

Результаты исследований и их обсуждение

Проводили исследование изменения формы ВАХ, выделяемой в нагрузку, при изменении частоты для различных напряжений на выходе генератора плазмы. На рис. 2 изображены ВАХ, построенные на основе зависимостей мгновенных напряжений (кВ) и токов I .

Частота сигнала, возбуждающего плазму в первичной обмотке повышающего трансформатора, изменялась от 45 до 50 кГц. Согласно рис. 2, рост амплитуды напряжения на электродах разрядной системы приводит не только к увеличению выходного тока (а значит, – и площади, ограниченной кривой ВАХ), но и существенно влияет на форму ВАХ. Наблюдается тенденция стремления формы ВАХ к эллипсоидной при увеличении выходного напряжения. Аналогичным образом проявляется влияние частоты на форму ВАХ. Изменение частоты возбуждающего сигнала в сторону приближения к резонансной приводит к увеличению амплитуды напряжения и, соответственно, площади кривой под ВАХ, а также к изменению ее формы.

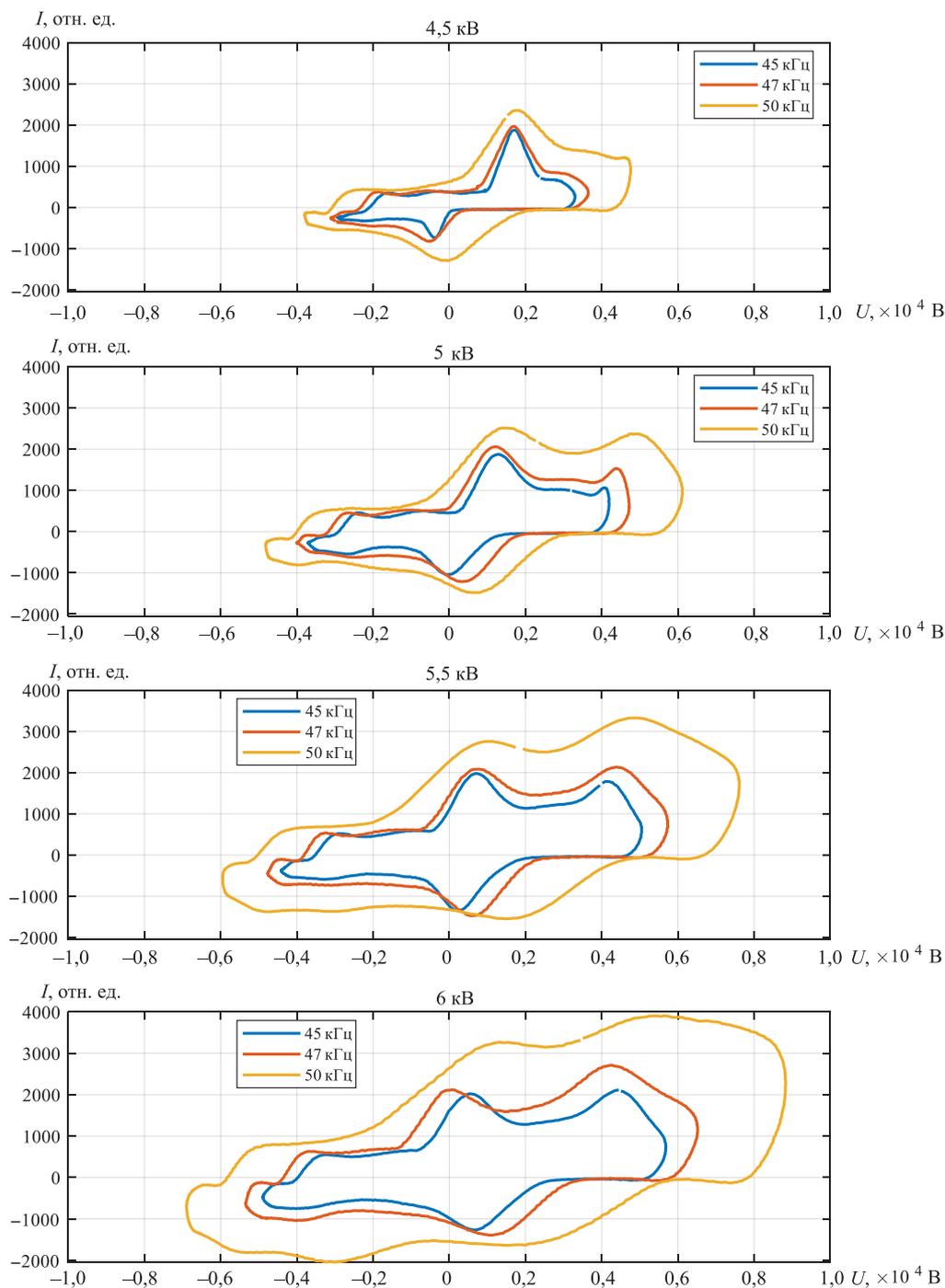


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики, построенные на основе зависимостей мгновенных напряжений и токов
Fig. 2. Volt-ampere characteristics constructed on the basis of the dependencies of instantaneous voltages and currents

Для оценки изменений формы ВАХ в зависимости от изменения частоты f и амплитуды возбуждающего сигнала проводились расчеты коэффициента формы $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$. Результаты представлены на рис. 3.

Зависимости изменения $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ носят возрастающий характер. Увеличение напряжения U на электродах разрядной системы и изменение частоты в сторону приближения к резонансной приводят к эллипсовидной форме сигнала и росту $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$. Таким образом, коэффициент формы ВАХ может быть использован для настройки в резонанс генератора при взаимодействии генератора с исследуемой поверхностью.

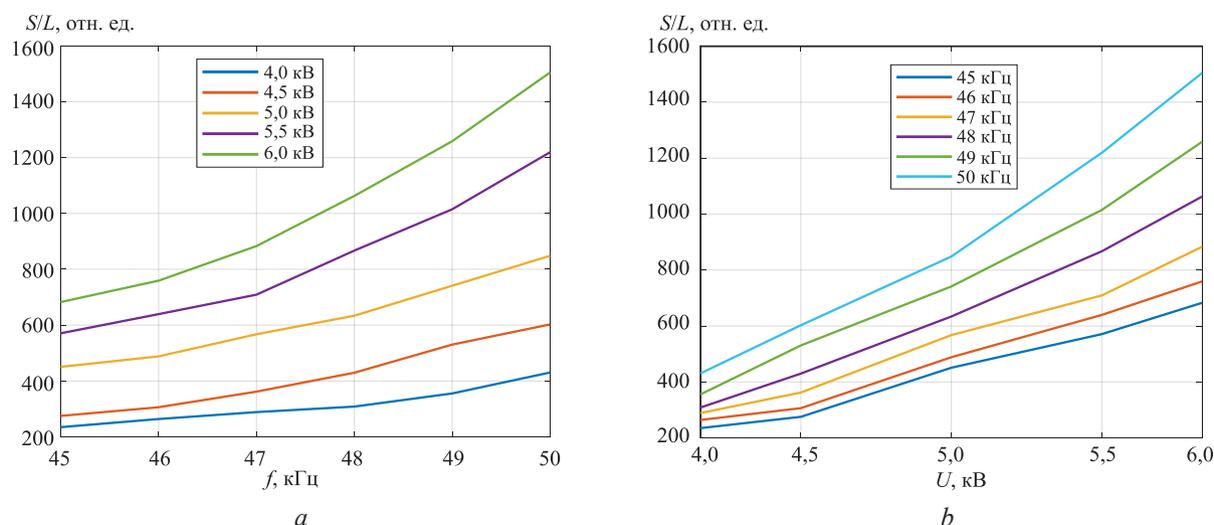


Рис. 3. Зависимость коэффициента формы $S_{\text{ВAX}}/L_{\text{ВAX}}$ от изменения: a – частоты; b – напряжения
Fig. 3. Dependence of the form factor $S_{\text{VAC}}/L_{\text{VAC}}$ on the change: a – frequency; b – voltage

Исследовали взаимодействие ХАП с поверхностью объектов, изготовленных из нержавеющей стали, стекла, латекса, резины, силикона и фторопласта. На рис. 4 показаны зависимости средней активной мощности P_{ext} , рассчитанной в относительных единицах для разных материалов при различных напряжениях на электродах в случае непосредственного контакта плазмы с поверхностью материала ($D = 0$ см).

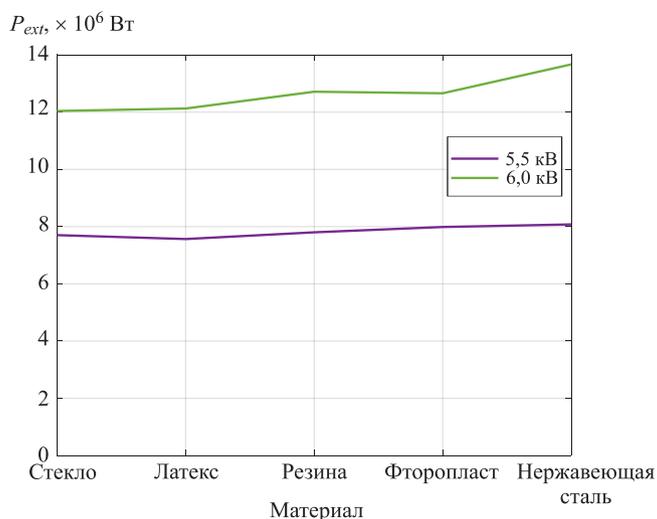


Рис. 4. Зависимость P_{ext} , рассчитанной в относительных единицах, выделяемой в нагрузку, при взаимодействии с различными материалами
Fig. 4. Dependence of P_{ext} , calculated in relative units, allocated in the load, when interacting with different materials

Как видно из рис. 4, взаимодействие ХАП с поверхностью разных материалов отличается: различия возрастают с увеличением напряжения на электродах. Наименьшее значение P_{ext} при 6 кВ наблюдается для стекла. Наибольшие значения P_{ext} характерны при взаимодействии плазмы с нержавеющей сталью. Для случая обработки поверхности из нержавеющей стали при напряжении на электродах 6 кВ мощность, выделяемая в нагрузку, примерно на 15 % больше мощности для случая взаимодействия с поверхностью объекта, изготовленного из стекла. Таким образом, взаимодействие плазмы с поверхностью различных материалов приводит к изменению выходной активной мощности генератора. При этом регистрируемая мощность для каждого типа материала индивидуальна.

На рис. 5 изображены зависимости изменения $S_{\text{BAХ}}/L_{\text{BAХ}}$ от расстояния L между факелом плазмы и поверхностью объекта. Как следует из рисунка, при непосредственном контакте с плазмой имеются существенные отличия в значениях $S_{\text{BAХ}}/L_{\text{BAХ}}$ для различных материалов. На расстоянии более 20 мм эти изменения минимальные. Таким образом, выделение энергии плазмы на поверхности материалов максимально при непосредственном контакте и практически не регистрируется на расстоянии более 20 мм.

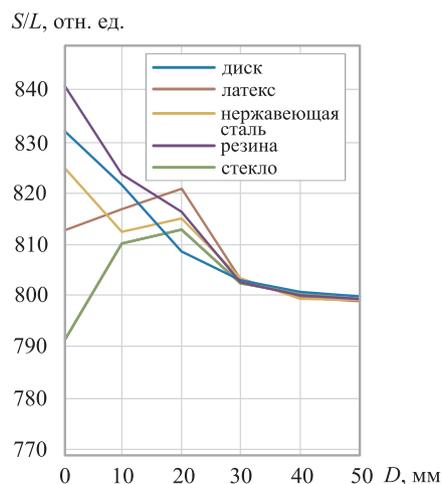


Рис. 5. Зависимость параметра формы от расстояния между факелом плазмы и поверхностью объекта
Fig. 5. Dependence of the shape parameter on the distance between the plasma torch and the surface of the object

В процессе исследований изучалось взаимодействие плазмы с поверхностью тканей биологических объектов. На рис. 6 представлены ВАХ в зависимости от расстояния D между факелом плазмы и поверхностью биологической ткани (поперечно-полосатая мышечная ткань). Отмечено изменение площади и формы ВАХ в диапазоне от 0 до 20 мм. Увеличение расстояния более 30 мм не приводит к существенному изменению формы ВАХ.

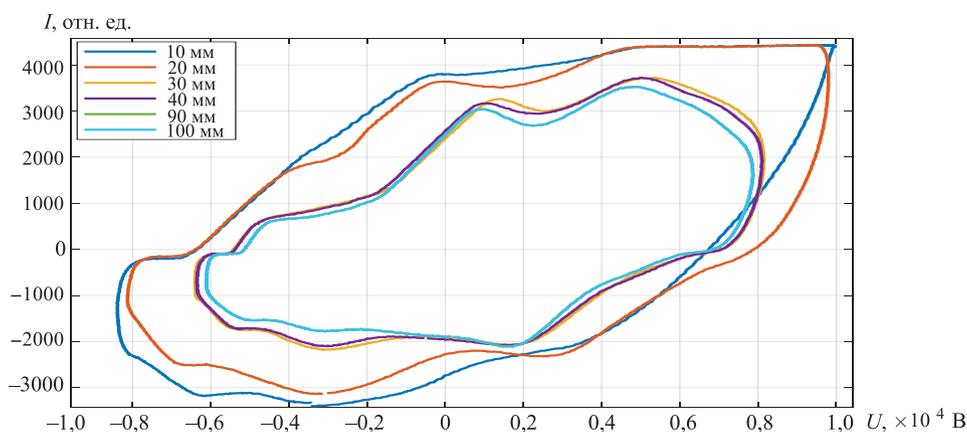


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики при взаимодействии плазмы с биологическими тканями (поперечно-полосатая мышечная ткань)
Fig. 6. Volt-ampere characteristics during the interaction of plasma with biological tissues (striated muscle tissue)

На рис. 7 показаны изменения коэффициента $S_{\text{BAХ}}/L_{\text{BAХ}}$ от расстояния между плазмой и поверхностью биологических тканей, которые наиболее существенны в диапазоне до 30 мм.

На рис. 8 приведены зависимости активной мощности P_{ext} , выделяемой в нагрузку, от напряжения на электродах разрядной системы при взаимодействии плазмы с подкожно-жировой клетчаткой и поперечно-полосатой мышечной тканью. Из рисунка видно, что при напряжении 4,5 кВ мощность P_{ext} для скелетной мышечной ткани на 18 % больше, чем для подкожно-жировой клетчатки, и с ростом выходного напряжения различие увеличивается. Это может объясняться отличиями в структуре и морфологии биологических тканей.

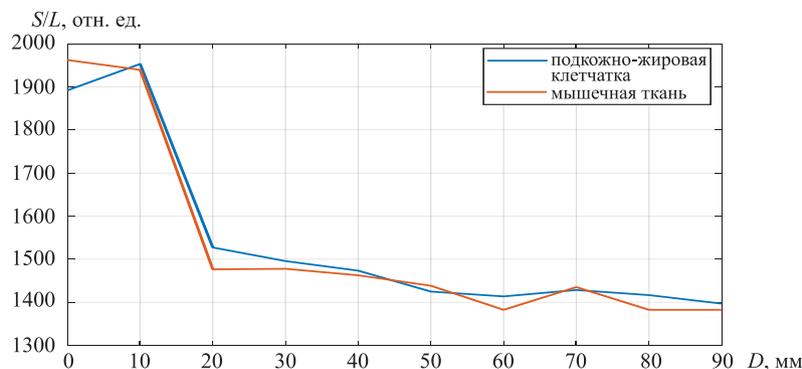


Рис. 7. Зависимость коэффициента формы вольт-амперной характеристики от расстояния между плазмой и поверхностью биологических тканей

Fig. 7. Change in the form factor of the volt-ampere characteristic depending on the distance between the plasma and the surface of biological tissues

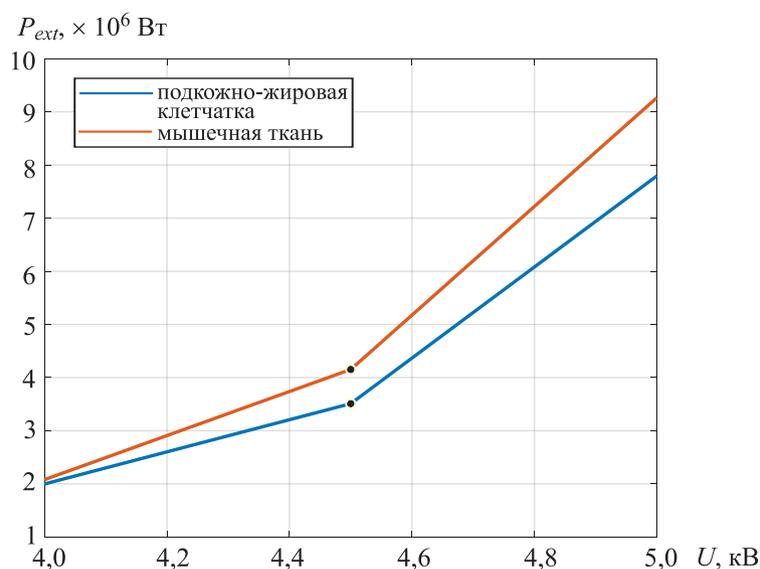


Рис. 8. Зависимость активной мощности P_{ext} , выделяемой в нагрузку, от напряжения на электродах разрядной системы

Fig. 8. Dependence of the active power P_{ext} released in the load on the voltage at the electrodes of the discharge system

Заключение

1. Для качественной и количественной оценки взаимодействия холодной атмосферной плазмы с поверхностью объектов предложено использовать изменение формы проходных вольт-амперных характеристик и значения активной мощности, выделяемой в нагрузку «плазма–объект».

2. Проведенные оценка воздействия плазмы на поверхности различных органических и неорганических материалов, биологических тканей, а также оценка взаимодействия с ними позволили установить, что мощность, выделяемая в нагрузку при взаимодействии с холодной плазмой, зависит от того материала, на который воздействует плазма. Этот параметр необходимо контролировать при обработке материалов и биологических тканей. Показано, что имеются различия в активной мощности, выделяемой на электродах разрядной системы, для образцов из брюшной стенки свиньи (подкожно-жировая клетчатка и мышечные ткани). При этом данное различие увеличивается с ростом выходного напряжения.

3. Активная мощность, выделяемая в нагрузку «плазма–объект», резко уменьшается при увеличении расстояния между факелом плазмы и поверхностью обрабатываемых объектов и практически отсутствует при расстоянии более 30 мм.

4. Увеличение напряжения на электродах разрядной системы и изменение частоты в сторону приближения к резонансной приводят к эллипсовидной форме сигнала и росту коэффициента формы вольт-амперной характеристики. Поэтому коэффициент формы может быть использован для настройки в резонанс генератора при взаимодействии генератора с поверхностью исследуемых объектов.

Список литературы

1. Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy / Reema [et al.] // *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Козырева, В. О. Плазменная медицина: перспективы и опыт применения низкотемпературной аргоновой плазмы в медицинской реабилитации / В. О. Козырева // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. 2022. Т. 21, № 5. С. 359–367. <https://doi.org/10.17816/rjpbr115273>.
3. Weltmann, K. D. Plasma Medicine – Current State of Research and Medical Application / K. D. Weltmann, Th. von Woedtke // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2016. Vol. 59, No 1. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014031>.
4. *Plasma Medical Science* / S. Toyokuni [et al.]. Cambridge: Academic Press, 2018.
5. Laroussi, M. Perspective: The Physics, Diagnostics, And Applications of Atmospheric Pressure Low Temperature Plasma Sources Used in Plasma Medicine / M. Laroussi, X. Lu, M. Keidar // *Journal Applied Physics*. 2017. Vol. 122, Iss. 4. <https://doi.org/10.1063/1.4993710>.
6. The Future for Plasma Science and Technology / K. D. Weltmann [et al.] // *Plasma Processes and Polymers*. 2019. Vol. 16, Iss. 1. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>.
7. Осипов, А. Н. Анализ электрических сигналов, возбуждающих низкотемпературную атмосферную плазму диэлектрического барьерного разряда / А. Н. Осипов, Т. Ма, В. А. Рокач // *Доклады БГУИР*. 2025. Т. 23, № 2. С. 44–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52>.
8. Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of the Interaction with the Surface of Objects / Tianbao Ma [et al.] // *Plasma Science and Technology*. Vol. 27, No 1.
9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. М.: Высш. шк., 1996.

Поступила 05.12.2025

Принята в печать 05.02.2026

References

1. Reema, Ruchel Khanikar R., Bailung H., Sankaranarayanan K. (2022) Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy. *Frontiers in Physics*. 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Kozyreva V. O. (2022) Plasma Medicine: Prospects and Experience of Using Low-Temperature Argon Plasma in Medical Rehabilitation. *Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation*. 21 (5), 359–367. <https://doi.org/10.17816/rjpbr115273> (in Russian).
3. Weltmann K. D., von Woedtke T. (2016) Plasma Medicine – Current State of Research and Medical Application. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 59 (1). <https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014031>.
4. Toyokuni S., Ikehara Y., Kikkawa F., Hori M. (2018) *Plasma Medical Science*. Cambridge, Academic Press Publ.
5. Laroussi M., Lu X., Keidar M. (2017) Perspective: The Physics, Diagnostics, And Applications of Atmospheric Pressure Low Temperature Plasma Sources Used in Plasma Medicine. *Journal of Applied Physics*. 122 (4). <https://doi.org/10.1063/1.4993710>.
6. Weltmann K. D., Kolb J. F., Holub M., Uhrlandt D., Šimek M., Ostrikov K., et al. (2019) The Future for Plasma Science and Technology. *Plasma Processes and Polymers*. 16 (1). <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>.
7. Osipov A. N., Ma T., Rokach V. A. (2025) Analysis of Electrical Signals Exciting Low-Temperature Atmospheric Plasma of Dielectric Barrier Discharge. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 44–52. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52> (in Russian).
8. Tianbao Ma, Kalenkovich Ya., Rokach V., Osipov A. (2025) Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of the Interaction with the Surface of Objects. *Plasma Science and Technology*. 27 (1).
9. Bessonov L. A. (1996) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits*. Moscow, Graduate School Publ. (in Russian).

Received: 5 December 2025

Accepted: 5 February 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Осипов А. Н., канд. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. центра «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ма Т., мл. науч. сотр. отрасл. лаб. «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», БГУИР

Тумилович М. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Пацеев А. В., гл. врач, Республиканский центр медицинской реабилитации и бальнеолечения

Пацеев С. В., директор, ООО «Клиника Мерси»

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Osipov A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Sectoral Laboratory at the Center for “Devices, Systems and Technologies for Medical Purposes”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Ma T., Junior Research Fellow at an Industry Laboratory of the Center for “Devices, Systems and Technologies for Medical Purposes”, BSUIR

Tumilovich M., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Patseyev A., Chief Physician, Republican Center for Medical Rehabilitation and Balneotherapy

Patseyeu S., Director, LLC “Mercy Clinic”

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoly